

## Проектирование и конструкция космических систем

УДК 629.78 (075)

**Куренков В. И., Лохматкин В. В.**

### **ОБОСНОВАНИЕ ЗАКОНА МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Важной задачей при разработке алгоритма имитационного моделирования отказов бортовых систем (БС) космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является выбор закона распределения случайного времени отказа. На практике для расчётов показателей надёжности и случайного времени отказа часто априорно используют экспоненциальный закон распределения, мотивируя это простотой этого закона и тем, что в некоторых частных случаях он хорошо согласуется с экспериментальными данными. Использование экспоненциальных законов распределения отказов бортовых систем в случаях их последовательного соединения в смысле надёжности формально приводит к экспоненциальному закону распределения отказов КА. В работе [1] обоснованность использования экспоненциального закона распределения отказов восстанавливаемых систем доказывается на основе предельных теорем для этого закона.

Однако бортовые системы КА состоят из элементов, распределение отказов которых может быть подчинено и другим законам. Кроме того, сами элементы могут быть резервированы, что также влияет на параметры распределения случайных величин времени отказа групп элементов и бортовых систем КА. В частности, резервирование элементов с экспоненциальными законами распределения отказов приводит к закону Вейбулла [2]. Согласно же одной из центральных предельных теорем теории вероятностей, если на объект воздействует множество случайных величин с произвольными законами распределения, и среди них нет преобладающих, то результирующий закон стремится к нормальному. В приведённых подходах усматривается некоторое противоречие. Не исключено, что функции распределения отказов КА в целом имеет некую композицию указанных законов.

В общем случае доказать возможность использования того или иного закона распределения можно статистически. Однако статистического материала по времени отказов бортовых систем КА заданного класса часто бывает недостаточно. Тем не менее, для моделирования отказов элементов, бортовых систем и КА в целом необходимо закон распределения каким-либо образом обосновать.

**Анализ закона распределения отказов бортовых систем КА.** Анализировался статистический материал по потоку отказов приборов БС одного из эксплуатируемых КА ДЗЗ

за определённый срок эксплуатации с разбивкой по кварталам года. Временем восстановления работоспособности приборов пренебрегали вследствие того, что это время значительно меньше срока активного существования. За анализируемый период был зафиксирован 41 отказ различных приборов бортовых систем. В качестве выборки рассматривался массив времени между отказами КА.

На рис. 1 пунктирной линией показана статистическая функции распределения времени наработки КА между отказами приборов целевой аппаратуры и бортовых обеспечивающих систем. Математическое ожидание рассматриваемой случайной величины и среднеквадратическое отклонение получились следующими:  $m_t = 746,8 \text{ час}$ ;  $\sigma_t = 1,277 \cdot 10^3 \text{ час}$ . Сплошной линией на этом же рисунке показан график экспоненциального закона распределения  $Y_t(t) = 1 - \exp(-\lambda \times t)$  с интенсивностью отказов, равной  $\lambda = 1/m_t = 1,339 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час}$ . Форма графика статистической функции распределения на первый взгляд близка к экспоненциальному закону. Однако это положение необходимо доказать или опровергнуть в статистическом смысле.

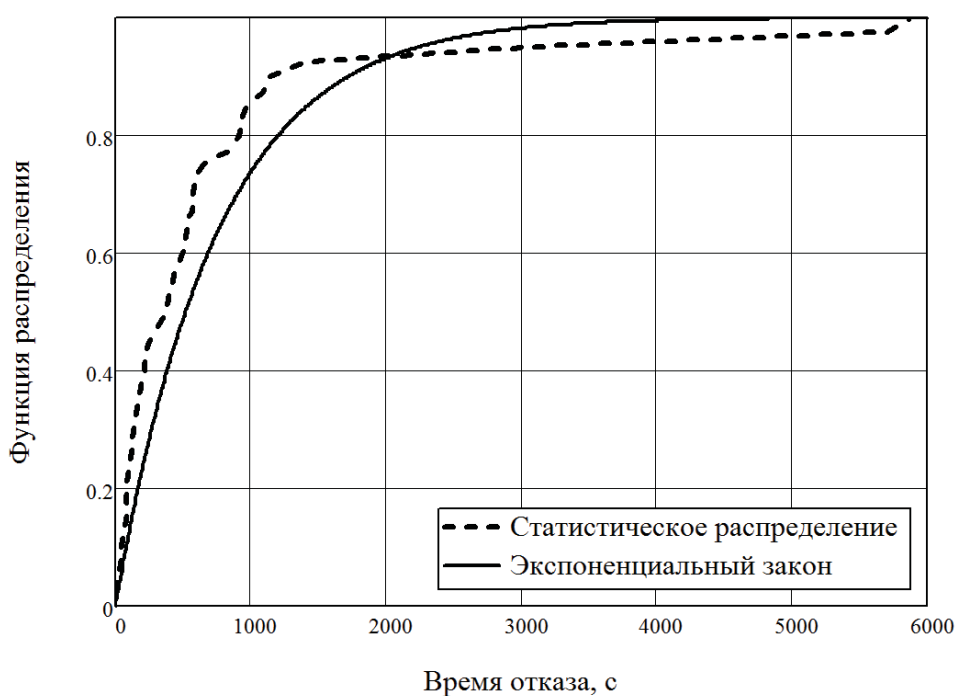


Рисунок 1 – Статистическая и экспоненциальная функции распределения времени отказов КА

Известно, что у экспоненциального закона распределения математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение численно равны. Для полученной выборки они отличаются. Поэтому, строго говоря, статистическая функция распределения не соответствует экспоненциальному закону. Другой вопрос заключается в том, какова степень различия или

совпадения статистической функции распределения с экспоненциальным законом с заданной доверительной вероятностью.

**Проверка статистической гипотезы об экспоненциальном законе распределения отказов бортовых систем КА.** Проверку будем осуществлять по критерию Бартлетта [3]

$$\chi^2_{\gamma, r-1} \leq B_r \leq \chi^2_{1-\gamma, r-1},$$

где  $\chi^2_{\gamma, r-1}$  и  $\chi^2_{1-\gamma, r-1}$  - квантили распределения Пирсона с соответствующими доверительными вероятностями ( $\gamma$  и  $(1-\gamma)$ ) и степенями свободы  $(r-1)$  ( $r$  – количество элементов выборки);

$B_r$  - функциональная зависимость статистики Бартлетта [3], которая выглядит следующим образом:

$$B_r = \frac{2r \left[ \ln \left( \frac{t_r}{r} \right) - \frac{1}{r} \left( \sum_{i=1}^r \ln t_i \right) \right]}{1 + \frac{(r+1)}{6r}},$$

где  $t_r$  - суммарное время наработки до отказов исследуемого объекта;  $t_i$  - значения элементов выборки ( $t_i$  - случайная величина, представляющая собой наработку между отказами КА).

В рассматриваемом случае  $r = 41$ ;  $t_r = 31529$ ;  $\sum_{i=1}^r \ln t_i = 237$ .

С учётом этого получаем

$$B_{41} = \frac{2 \cdot 41 \cdot \left[ \ln \left( \frac{31529}{41} \right) - \frac{1}{41} \cdot 237,9 \right]}{1 + \frac{42}{246}} = 59,05.$$

При доверительной вероятности 0,99 по таблицам распределения Пирсона [3] можно найти следующие граничные значения:  $\chi^2_{0,99;40} = 22,142$ ;  $\chi^2_{0,01;40} = 63,706$ . Вычисленное значение статистики Бартлетта принадлежит интервалу, описываемому граничными значениями «хи-квадрат». Таким образом, гипотеза об экспоненциальном законе распределения принимается с доверительной вероятностью 99%. Отметим, что если брать меньшие значения доверительной вероятности, например, 0,95 или 0,90, то данную гипотезу следует отвергнуть.

**Анализ законов распределения отказов нескольких КА.** Заметим, что статистика

по отказам однотипных КА ограничена. Это объясняется тем обстоятельством, что КА постоянно совершенствуются и новые разработки существенно отличаются от прототипов. Тем не менее, имеются данные по реальному сроку активного существования некоторых КА, например, для КА *Landsat*. С 1972 года по 2013 год было запущено 7 КА, срок службы которых был следующим: *Landsat 1* – 6 лет; *Landsat 2* – 7 лет; *Landsat 3* – 5 лет; *Landsat 4* – 11 лет; *Landsat 5* – 28 лет; *Landsat 6* – 0 (авария на старте); *Landsat 7* – 14 лет [4].

Для обоснования выбора закона распределения при моделировании отказов КА, необходимо построить эмпирическую функцию надёжности для КА *Landsat* и теоретические функции надёжности для экспоненциального, нормального и усечённого нормального законов распределения. Указанные функции построены и приведены на рис. 2.

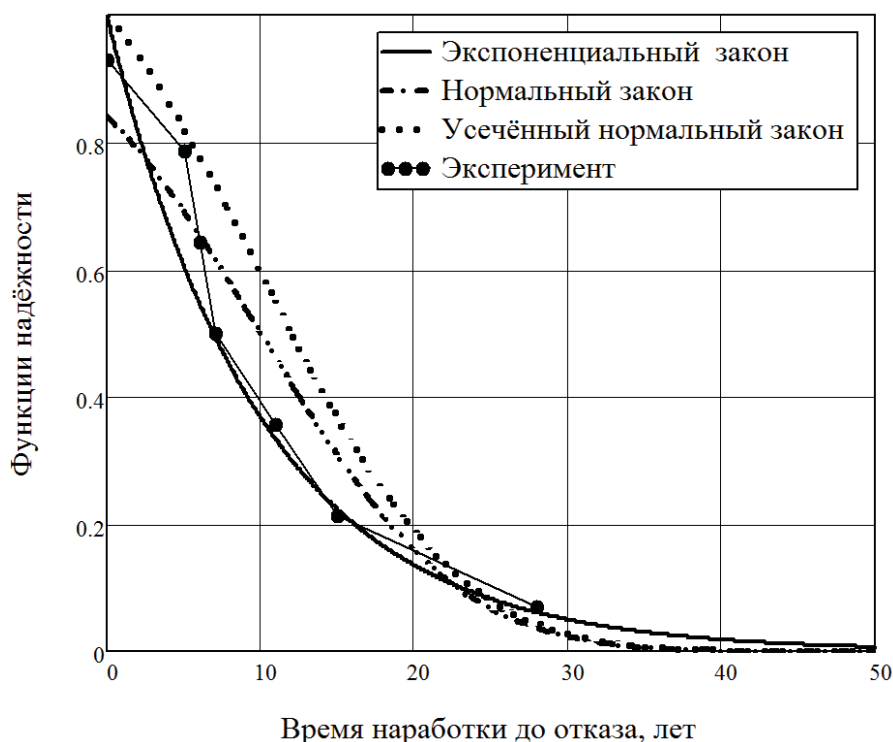


Рисунок 2 – Функции надёжности КА

Экспоненциальный закон надёжности был построен для параметра интенсивности отказов, равного  $0,097 \text{ 1/год}$ . Этот параметр был определён на основе оценки математического ожидания времени отказа КА *Landsat*, которое составило (без учёта аварийного КА)  $m_i = 10,29$  лет. Для построения нормального закон надёжности кроме математического ожидания рассчитывалось среднеквадратическое отклонение, которое составило  $D_i = 4,93$  года. Усечённый нормальный закон строился на основе следующей зависимости:

$$H_{yc}(t) = 1 - \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}D_t} \int_0^x \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(t-m_t)^2}{D_t^2}\right) dt}{1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}D_t} \int_0^x \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(t-m_t)^2}{D_t^2}\right) dt}.$$

Анализ результатов показывает, что экспериментальный график надёжности КА по форме напоминает закон Вейбулла. В области малых значений наработки до отказа КА этот график располагается выше экспоненциального и нормального законов и ниже усечённого нормального закона распределения. В области средних значений наработки до отказа график экспериментальной функции надёжности располагается близко к экспоненциальному закону, но ниже нормального и усечённого нормального законов распределения.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. С учётом распределения отказов бортовых систем КА (рис. 1) для моделирования можно использовать экспоненциальный закон надёжности с доверительной вероятностью 0,99.

2. Для КА в целом экспериментальный график закона распределения надёжности в области малых значений наработки до отказа отклоняется от экспоненциального закона, что не противоречит центральной предельной теореме. Использование экспоненциального закона надёжности для моделирования отказов в целом (рис. 2) приводит к некоторому запасу по надёжности реальных КА.

### Библиографический список

- 1 Бразирович, Е.Ю. Вопросы математической теории надёжности [Текст] / Е.Ю. Бразирович, Ю.К. Беяев, В.А. Каштанов и др.; под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.
- 2 Куренков, В.И. Методы расчёта и обеспечения надёжности ракетно-космических комплексов: учеб. пособие [Текст] / В.И. Куренков, В.А. Капитонов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 320 с.
- 3 Капур, К. Надёжность и проектирование систем [Текст] / К. Капур.- М.: Мир, 1980. – 598 с.
- 4 Афанасьев, И. 40 лет на гражданской службе / Новости космонавтики. № 4 (363), 2013. Том 23. С. 62-64.